

# NUMERICAL ANALYSES OF THE EFFECTS OF TUNNELS CONSTRUCTION

by

Maciej Ochmański

Submitted to the Department of Geotechnics and Roads (SUT)  
and Department of Civil and Mechanical Engineering (UCLAM)  
in partial fulfillment of the requirements for the degree of

Doctor of Philosophy in Civil Engineering

at the

SILESIA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY (SUT)  
and  
UNIVERSITY OF CASSINO AND SOUTHERN LAZIO (UCLAM)

March 2016

Author .....  
Department of Geotechnics and Roads (SUT)  
Department of Civil and Mechanical Engineering (UCLAM)

Certified by.....  
Joanna Bzówka  
Associate Professor (SUT)  
Thesis Supervisor

Certified by.....  
Giuseppe Modoni  
Associate Professor (UCLAM)  
Thesis Supervisor

---

# Analisi numeriche degli effetti della costruzione di gallerie

Maciej Ochmański

Sottomesso al Dipartimento di Geotecnica e Strade (SUT)  
ed al Dipartimento di Ingegneria Civile e Meccanica (UCLAM)  
il 2 marzo 2016, in parziale adempimento dei  
requisiti per il titolo di  
Dottore di Ricerca

## Astratto

Le sviluppo di tecnologie sempre più rapide ed efficienti per la realizzazione delle gallerie hanno aperto nuovi scenari urbanistici rendendo possibile la realizzazione di infrastrutture sotterranee in ambienti fortemente antropizzati. Così come per tutte le opere geotecniche, gli effetti della costruzione di una galleria sull'ambiente circostante è un tema di particolare complessità e sebbene sia ben noto come la particolare tecnica di costruzione utilizzata influisca fortemente sul comportamento del complesso opera-terreno, raramente i modelli concettuali adottati per la progettazione tengono conto in maniera adeguata di questo aspetto. Sovente il progettista ricorre a semplici regole o si basa sulla propria esperienza professionale. La carenza di robuste basi analitiche si traduce spesso in previsioni poco accurate con effetti talvolta inattesi. Ne consegue che si renda necessario accompagnare l'esecuzione con un attento piano di monitoraggio, ricorrendo al cosiddetto "metodo osservazionale", mediante il quale i parametri di progetto vengono continuamente ricalibrati sulla base dei dati provenienti da sofisticate reti di monitoraggio. L'idea alla base del presente lavoro di tesi è che modelli numerici avanzati, capaci di considerare i dettagli costruttivi spesso ignorati dai progettisti o considerati di secondaria importanza, possano integrare (ma non sostituire!!) le osservazioni, guidando i progettisti ed i costruttori a soluzioni più razionali ed efficienti.

Questo lavoro è quindi volto ad analizzare il processo di realizzazione di gallerie concentrandosi sull'influenza dei fattori tecnologici. A tale scopo, la successione delle fasi costruttive deve essere ricostruita con grande cura e devono essere introdotti modelli appropriati per simulare la successione delle fasi di realizzazione: l'iniezione e l'indurimento delle malte, l'inserimento di rinforzi, le fasi di scavo, etc.. Inizialmente sono state analizzate le tecniche di realizzazione delle gallerie più frequentemente adottate, distinguendole gli approcci convenzionali da quelli completamente automatizzati. Successivamente, analizzando le evidenze sperimentali ottenute da studi di laboratorio e dall'osservazione di opere in vera grandezza, sono stati identificati i meccanismi di base determinati dalle differenti lavorazioni. L'attenzione è stata quindi focalizzata sugli strumenti di previsione, analizzando e classificando i metodi disponibili in letteratura. Il nucleo del presente lavoro è quindi rappresentato dalla simulazione numerica con-

---

dotta con il codice agli elementi finiti ABAQUS, tale strumento è stato utilizzato nella simulazione della realizzazione di gallerie con due differenti metodologie: la prima più convenzionale con rivestimento provvisorio formato da coronelle di jet-grouting, la seconda di tipo meccanizzato con l'ausilio della [Tunnel Boring Machine \(TBM\)](#). In entrambi i casi, si è fedelmente riprodotta la realizzazione delle gallerie tramite due casi studio presi a riferimento: la prima realizzata in prossimità di Firenze con la prima tecnologia e la seconda in cui si è impiegato lo scavo meccanizzato con [Earth Pressure Balance \(EPB\)](#), a Bangkok (Tailandia). Questi esempi costituiscono dei veri e propri “benchmark” per le analisi condotte, grazie all'ampia disponibilità di dati concernenti le caratteristiche del sottosuolo, le sequenze di lavorazione e il monitoraggio degli spostamenti a piano campagna. I modelli numerici tridimensionali adottati per simulare i casi studio sono stati realizzati ponendo particolare attenzione agli aspetti tecnologici che caratterizzano le due diverse metodologie di realizzazione. Per ciò che concerne il tunnel italiano, il modello riproduce fedelmente le fasi di rinforzo del fronte con l'ausilio di infilaggi, di installazione delle singole colonne di jet-grouting costituenti l'opera di sostegno provvisorio del contorno, di scavo e di realizzazione del rivestimento temporaneo e definitivo. Il modello utilizzato per simulare la tecnica di scavo meccanizzato è stato concepito introducendo una dettagliata simulazione dello scudo, della pressione al fronte, del fluido di iniezione a tergo del rivestimento e della posa in opera del rivestimento. Le condizioni stratigrafiche ed idrodinamiche sono state modellate per mezzo di un'analisi non lineare accoppiata.

Per ciò che riguarda la tecnica di scavo convenzionale, il comportamento del terreno è stato simulato adottando tre leggi costitutive di crescente complessità ed è stata analizzata la loro influenza sui risultati ottenuti. Per il materiale cementato, si è considerata l'evoluzione della rigidità e resistenza nel tempo. In particolare per ciò che riguarda la tecnica di scavo mediante [EPB](#), è stato realizzato un apposito codice implementato in Fortran che tiene conto delle deformazioni irreversibili indotte dal processo di idratazione delle miscele cementizie. Allo scopo di analizzare in maniera parametrica l'influenza dello spazio compreso tra il terreno ed il rivestimento e della pressione al fronte, è stato implementato un codice in ambiente Python per velocizzare la generazione del modello. L'elevato tempo richiesto per il calcolo è stato ridotto grazie a calcolatori dotati di elevate prestazioni ([PC](#) e [HPC](#)).

I risultati ottenuti dalle simulazioni sono stati quindi analizzati criticamente concentrandosi sugli aspetti di maggiore interesse dal punto di vista tecnico: cedimenti al piano campagna e sollecitazioni degli elementi strutturali.

Tutore: Joanna Bzówka

Titolo di studio: Professore Associato di Geotecnica (SUT)

Tutore: Giuseppe Modoni

Titolo di studio: Professore Associato di Geotecnica (UCLAM)